

ГЛАВА 8. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ШАРЫ-ЗОНДЫ

8.1 ОБОЛОЧКИ

8.1.1 Основные виды оболочек

В метеорологии используются следующие два основных типа оболочек:

- a) шары-пилоты, применяемые для визуальных измерений ветра на высотах и высоты нижней границы облаков, обычно поднимают небольшой груз и поэтому значительно меньше радиозондовых баллонов. Они почти всегда представляют собой эластичный шар, а основное требование к ним, помимо способности достигать достаточной высоты, заключается в том, что при подъеме они должны сохранять строго шарообразную форму;
- b) оболочки, используемые для подъема записывающих или передающих приборов при регулярных аэрологических наблюдениях, как правило, имеют шарообразную форму и могут растягиваться. Обычно они известны как радиозондовые баллоны или шары-зонды. Их размер и качество должны обеспечивать подъем требуемого груза (обычно от 200 г до 1 кг) на высоту до 35 км (WMO, 2002) со скоростью подъема, при которой обеспечивается достаточная вентиляция датчиков и измерительных элементов. Для измерения ветра на высотах радиолокационными методами используются большие шары-пилоты (100 г) или шары-зонды, причем размер оболочек зависит от массы поднимаемого оборудования и от его аэродинамических характеристик.

Оболочки других типов, используемые для специальных целей, в этой главе не описываются. Уравновешенные шары-зонды, которые поднимаются и держатся в воздухе на заранее определенном уровне, делают из нерастягивающегося материала. Большие шары-зонды постоянного уровня при запуске наполняются не в полном объеме. Шары-зонды постоянного уровня со сверхвысоким давлением наполняются при запуске до полного растяжения. Тетроны представляют собой небольшие уравновешенные шары-зонды сверхвысокого давления четырехгранной формы, которые используются для изучения траекторий. Использование привязных аэростатов для получения профилей обсуждается в данном томе, глава 5.

8.1.2 Материалы для оболочек и их свойства

Наилучшими материалами для изготовления растягиваемых оболочек являются высококачественный природный каучуковый латекс и синтетический латекс, основанный на полихлоропрен. Изделия из натурального латекса держат форму лучше, чем полихлоропреновые, и являются более прочными. Их также можно изготавливать из более толстой пленки для придания им определенных характеристик. Они менее подвержены воздействию температуры, но в большей степени реагируют на озон и ультрафиолетовое излучение на больших высотах, и срок хранения их меньше. Оба материала могут смешиваться с различными добавками для увеличения срока их хранения, повышения прочности и улучшения их характеристик при низких температурах как во время хранения, так и в ходе полета, а также для того, чтобы на них меньше сказывалось влияние озона и ультрафиолетового излучения. В процессе изготовления оболочек, предназначенных для наполнения водородом, в качестве меры предохранения от взрыва можно добавлять антистатик.

Существуют два основных способа изготовления растяжимых оболочек. Оболочка может быть произведена путем погружения формы в латексную эмульсию или посредством формирования ее на внутренней поверхности полый формы. В последнем случае можно изготовить более однородные по толщине оболочки, что желательно для достижения

больших высот, поскольку при этом оболочка растягивается; горловина может изготавливаться как единое целое с остальной частью оболочки, что дает возможность избежать образования возможного слабого участка.

Нерастягивающимся материалом, используемым для производства уравновешенных шаров-зондов, является полиэтилен.

8.1.3 Технические характеристики оболочек

Готовые оболочки должны быть свободны от посторонних вкраплений, мельчайших проколов или других дефектов; они также должны быть однородными и иметь одинаковую толщину материала. Диаметр их горловины должен составлять 1–5 см, а длина 10–20 см в зависимости от размера оболочки; горловина радиозондовой оболочки должна выдерживать воздействие с силой в 200 Н без разрыва. Для того чтобы уменьшить возможность отрыва горловины, важно, чтобы толщина материала оболочки постепенно увеличивалась по направлению к горловине. Резкое изменение толщины уменьшает прочность.

Оболочки различаются по размеру – их номинальной массе в граммах. Фактическая масса отдельных оболочек не должна отличаться от установленной номинальной массы больше чем на 10 %, а предпочтительнее на 5 %. Их расширение должно быть, по крайней мере, четырехкратным, а желательно пяти- или шестикратным по отношению к диаметру нерастянутой оболочки, и такое расширение должно сохраняться как минимум в течение часа. Наполненные оболочки должны иметь шарообразную или грушевидную форму.

Важным представляется вопрос о сроке хранения оболочек, особенно в тропических условиях. Существуют испытания на искусственное старение, однако они не дают надежных результатов. Одно из таких испытаний заключается в том, что образцы оболочек держат в печи при температуре 80 °С в течение четырех дней, что примерно соответствует четырем годам хранения в тропиках, после чего эти образцы должны по-прежнему удовлетворять требованиям минимального растяжения. Во избежание быстрой порчи оболочек их следует тщательно упаковывать для предохранения от воздействия света (особенно солнечного), свежего воздуха и экстремальных температур.

Оболочки, изготовленные из синтетического латекса, содержат пластификатор, предотвращающий уплотнение или замерзание пленки при низких температурах, наблюдающихся вблизи тропопаузы и выше нее. Некоторые изготовители предлагают оболочки, предназначенные для использования только в ночное или в дневное время, причем содержание пластификатора в них различно.

8.2 СВОЙСТВА ОБОЛОЧЕК

8.2.1 Скорость подъема

В соответствии с принципом плавучести полная подъемная сила шара определяется подъемной силой находящегося в нем газа следующим образом:

$$T = V(\rho - \rho_g) = 0,523 D^3 (\rho - \rho_g) \quad (8.1)$$

где T — полная подъемная сила; V — объем шара; ρ — плотность воздуха; ρ_g — плотность газа; D — диаметр оболочки (предполагается, что она имеет форму шара).

Все величины выражены в единицах СИ. Для водорода на уровне земной поверхности подъемная сила $(\rho - \rho_g)$ составляет около 1,2 кг·м⁻³. Все величины в уравнении 8.1 изменяются с высотой.

Свободная подъемная сила шара L есть величина, на которую полная подъемная сила превышает общий вес W оболочки и груза (если таковой имеется):

$$L = T - W \quad (8.2)$$

т. е. это результирующая подъемная сила или дополнительный вес, который оболочка со всеми принадлежностями будет выдерживать, не поднимаясь и не опускаясь.

Используя принцип динамического подобия, можно показать, что скорость подъема V шара в неподвижном воздухе можно выразить общей формулой.

$$V = \frac{qL^n}{(L + W)^{1/3}} \quad (8.3)$$

в которой q и n зависят от коэффициента торможения и, следовательно, от числа Рейнольдса $\nu\rho D/\mu$ (где μ — вязкость воздуха). К сожалению, для большого числа метеорологических оболочек на некоторых стадиях полета число Рейнольдса находится в пределах критической области $1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^5$, где наблюдается быстрое изменение коэффициента торможения; при этом форма оболочек может отличаться от шарообразной. Поэтому представляется практически нецелесообразным использование простой формулы, применимой для оболочек различных размеров и имеющих разную свободную подъемную силу. Следовательно, значения q и n в приведенной выше формуле надо определять экспериментальным путем; как правило, очень приблизительно их можно принять равными 150 и 0,5 соответственно в том случае, если скорость подъема выражается в м·мин⁻¹. Другие факторы, такие как изменение плотности воздуха и утечка газа, также могут влиять на скорость подъема и вызывать ощутимые ее колебания в зависимости от высоты.

При зондировании в условиях выпадения осадков или обледенения может потребоваться увеличение свободной подъемной силы почти на 75 % в зависимости от сложности обстановки. Предполагаемую скорость подъема не следует использовать при выпадении любых осадков, за исключением слабых. Точные данные о скорости подъема обычно не требуются. Однако они необходимы при проведении шаропилотных измерений ветра или определении нижней границы облаков, когда нет других средств определения высоты. Скорость подъема зависит, главным образом, от свободной подъемной силы и сопротивления воздуха, действующего на оболочку и подвес. Сопротивление может быть более важным, особенно в случае отклонения формы оболочки от сферической. Максимальная высота подъема зависит, главным образом, от полной подъемной силы и от размера и качества оболочки.

8.2.2 Эксплуатационные качества оболочек

В таблице в данном разделе приводятся типичные значения характеристик оболочек различных размеров. Они являются весьма приблизительными. Если необходима точная информация о характеристиках конкретных оболочки и подвеса, то она должна быть получена путем анализа фактических запусков. Полезная нагрузка, которую несет оболочка, может быть больше указанной в таблице в том случае, если увеличивается полная подъемная сила. Это достигается путем использования большего объема газа, что приводит к увеличению объема оболочки и, следовательно, влияет на скорость подъема и максимальную высоту.

Типичные характеристики оболочек

Вес (г)	10	30	100	200	350	600	1000	1500	3000
Диаметр при выпуске (см)	30	50	90	120	130	140	160	180	210
Полезная нагрузка (г)	0	0	0	250	250	250	250	1000	1000
Свободная подъемная сила (г)	5	60	300	500	600	900	1100	1300	1700
Скорость подъема (м·мин ⁻¹)	60	150	250	300	300	300	300	300	300
Максимальная высота подъема (км)	12	13	20	21	26	31	34	34	38

При выборе оболочки для метеорологических целей руководствуются массой поднимаемого груза, если таковой имеется, скоростью подъема, требуемой высотой, возможным использованием оболочки для визуального слежения, а также облачным покровом в том, что касается ее цвета. Как правило, предпочтительнее высокая скорость подъема — от 300 до 400 м·мин⁻¹, это позволяет сократить время наблюдения и при необходимости обеспечить достаточную вентиляцию датчиков радиозонда. При выборе оболочки необходимо помнить, что достигаемая высота обычно меньше в тех случаях, когда температура при запуске очень низкая.

При использовании воздушных шаров в регулярных наблюдениях предпочтителен свободный подъем, при котором высота разрыва оптимальна. Например, было установлено, что уменьшение средней скорости подъема от 390 до 310 м·мин⁻¹ при использовании некоторых шаров среднего размера с уменьшенным количеством газа может позволить увеличить высоту разрыва в среднем на 2 км. Полученные данные о высоте разрыва следует сохранять и анализировать, для того чтобы убедиться в оптимальности достигнутых результатов.

Визуальные наблюдения легче проводить при использовании неокрашенных оболочек в ясные солнечные дни и окрашенных в темные тона в пасмурные дни.

Характеристики оболочки лучше всего определяются по максимальному линейному растяжению, которое она выдерживает до разрыва, и наиболее удобным способом его выражения является соотношение диаметра (или длины окружности) в момент разрыва к диаметру нерастянутой оболочки. Однако характеристики оболочки в полете не всегда совпадают с характеристиками, определенными в ходе испытания на разрыв на земле. На эти характеристики может повлиять неосторожное обращение с оболочкой во время ее наполнения, а также напряжение во время запуска при сильном ветре. В полете на растяжимость оболочки может повлиять потеря эластичности при низкой температуре, химическая активность кислорода и озона и ультрафиолетовое излучение, а также производственные дефекты, например свищи или неоднородность латексной пленки. Однако на практике оболочка, обладающая удовлетворительными качествами, должна выдерживать по меньшей мере четырехкратное растяжение. Толщина пленки при запуске обычно колеблется от 0,1 до 0,2 мм.

Во время подъема внутри оболочки всегда существует небольшое избыточное давление p_1 , достигающее нескольких гектопаскалей и обусловленное натяжением

каучука. Это устанавливает предел по отношению к внешнему давлению, которое может быть достигнуто. Можно показать, что при одинаковой температуре внутри и вне оболочки предельное давление p описывается выражением:

$$p = \left(\frac{1,07W}{L_0} + 0,075 \right) p_1 \cong \frac{Wp_1}{L_0} \quad (8.4)$$

где W — масса оболочки и аппаратуры, а L_0 — свободная подъемная сила на уровне земной поверхности; и то и другое выражается в граммах. Если оболочка способна достичь высоты, соответствующей p , то на этой высоте она будет дрейфовать.

8.3 ОБРАЩЕНИЕ С ОБОЛОЧКАМИ

8.3.1 Хранение

Очень важно правильно хранить радиозондовые оболочки для того, чтобы их качество не ухудшалось после нескольких месяцев хранения. Рекомендуется ограничивать запасы оболочек тем минимумом, который требуется для оперативных нужд. Там, где это возможно, частые поставки оболочек предпочтительнее, чем закупки их в большом количестве с последующим длительным хранением. Во избежание необходимости использования оболочек, хранившихся длительное время, их следует расходовать в порядке дат их изготовления.

Оптимальная сохранность обычно обеспечивается в течение приблизительно 18 месяцев после изготовления при условии тщательного соблюдения условий хранения. Многие изготовители составляют инструкции к своим оболочкам, которые следует тщательно соблюдать. Однако нижеследующие общие рекомендации применимы для большинства типов радиозондовых оболочек.

Оболочки следует предохранять от прямого воздействия солнечного света и по возможности хранить в темноте. Ни в коем случае нельзя их хранить рядом с источником тепла или озона. Свойства полихлоропреновых оболочек или оболочек, изготовленных из смеси полихлоропрена и натурального каучука, могут ухудшаться при воздействии озона, выделяемого в процессе работы больших электрогенераторов или электродвигателей. Все оболочки следует хранить в их оригинальной упаковке до момента предполетной подготовки. Необходимо следить за тем, чтобы они не соприкасались с маслами или любыми другими веществами, которые могут просочиться сквозь упаковку и повредить оболочку.

Везде, где можно, оболочки следует хранить в помещении при температуре от 15 до 25 °С; некоторые изготовители дают особые указания на этот счет, которым необходимо следовать.

8.3.2 Подготовка к запуску

Оболочки, изготовленные из натурального каучука, перед использованием не требуют специальной тепловой обработки, поскольку натуральный каучук не замерзает при обычных для жилых и служебных помещений температурах. Однако желательно, чтобы оболочки, которые длительное время хранились при температуре 10 °С, выдерживались при комнатной температуре в течение нескольких недель перед их использованием.

Полихлоропреновые оболочки при длительном хранении при температуре ниже 10 °С частично теряют свою эластичность. Для получения наилучших результатов необходимо восстановить эластичность до момента наполнения посредством подготовки оболочки. При этом следует выполнять рекомендации изготовителя. Обычно оболочка помещается в термически изолированную камеру с принудительной циркуляцией воздуха, в которой поддерживаются необходимые температура и влажность, за несколько дней до ее наполнения; в качестве альтернативы можно использовать теплую водяную баню.

На полярных станциях в периоды экстремально низких температур рекомендуется использовать оболочки, обладающие особыми свойствами, позволяющими им сохранять прочность и эластичность в таких условиях.

8.3.3 Наполнение

В том случае, если для запуска шаров не используется пусковое устройство, наполнение оболочек необходимо проводить в специальном помещении, по возможности изолированном от других зданий. Оно должно хорошо проветриваться (например, NFPA, 1999). При использовании водорода важно соблюдать особые меры осторожности (см. 8.6). Из помещения необходимо удалить все источники образования искр, а все электрические выключатели и осветительная арматура должны быть искробезопасными; другие необходимые подробности содержатся в п. 8.6. При использовании гелия в холодную погоду помещение следует прогреть. Стены, двери и пол должны быть гладкими, и в помещении не должно быть песка и пыли. Отопление мест, используемых для наполнения водородом, можно обеспечивать посредством пара, горячей воды или любых других косвенных средств; в то же время электрическое отопление, если оно имеется, должно соответствовать национальным электротехническим нормам (например, NFPA 50A для класса I, раздел 2, помещения).

На время наполнения необходимо надеть защитную одежду (см. 8.6.4). Оператор не должен находиться в закрытом помещении, в котором размещена оболочка с водородом. Если двери в помещении закрыты, следует контролировать поступление водорода и наблюдать за операцией наполнения за пределами того помещения, в котором она происходит; двери следует оставить открытыми, если оператор находится в помещении, где наполняется оболочка.

Наполнение оболочек должно производиться медленно, поскольку быстрое растягивание может привести к образованию слабых мест в оболочке шара. Целесообразно иметь специальный редуктор для регулирования подачи газа. Требуемую величину наполнения (свободную подъемную силу) можно определить, используя либо наконечник шланга того же веса, либо такой наконечник, который может быть одним плечом весов, на которых другим плечом будет подъемная сила оболочки. Последний способ менее удобен; исключения составляют случаи, когда требуется учитывать изменения веса оболочек, что вряд ли необходимо в повседневной работе. Полезно иметь вентиль, подогнанный к весовому наполнителю, а в некоторых службах используется дополнительное устройство с клапаном, который может быть отрегулирован таким образом, что он закрывается автоматически при достижении требуемой подъемной силы.

8.3.4 Запуск

Оболочка должна находиться в укрытии до момента запуска. Следует избегать длительного воздействия яркого солнечного света, поскольку это может привести к быстрому ухудшению качества материала оболочки и даже к разрыву прежде, чем шар оторвется от земли. Во время запусков вручную необходимо использовать защитную одежду.

Запуск радиозондовых оболочек при слабом ветре не вызывает особых затруднений. Необходимо позаботиться о том, чтобы отсутствовала опасность столкновения шара и подвешенных приборов с различными препятствиями, прежде чем шар поднимется выше окружающих станцию деревьев и сооружений. Этих трудностей при запуске в значительной степени можно избежать путем тщательного выбора места запуска. Оно должно определяться минимумом препятствий, которые могут затруднить запуск, а сооружения на станции следует проектировать и располагать с учетом преобладающего направления ветра, возможности порывов ветра на площадке для запуска и метелей в районах с холодным климатом.

При сильном ветре рекомендуется также крепить приборы по возможности ближе к оболочке, используя для подвески специальные катушки или разматывающие приспособления. Удобное устройство состоит из катушки, на которую намотан шнур, и шпинделя, который приводит в действие воздушный тормоз или механизм спуска, позволяющий шнуру с подвешенными приборами медленно разматываться в начале полета шара.

Огромное преимущество механических устройств для запуска шаров заключается в том, что их конструкция позволяет обеспечить почти полную безопасность, поскольку оператор не находится рядом с шаром во время наполнения оболочки и запуска. Механические пусковые устройства могут быть автоматизированы в различной степени и даже настолько, что для всей работы по запуску радиозонда не потребуется присутствия оператора. Они могут быть неэффективны при скорости ветра более $20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Необходимо обеспечить адекватную вентиляцию датчиков радиозонда до его запуска. Желательно иметь такую конструкцию, которая позволит избежать повреждения сооружения в случае пожара или взрыва.

8.4 ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ СНАРЯЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДЪЕМА ШАРОВ

8.4.1 Освещение при подъеме в ночное время

Обычно в качестве источника света при подъеме шаров-пилотов в ночное время используется лампочка, питаемая от небольшой электрической батарейки. Как правило, в этом случае подходит батарейка, состоящая из двух гальванических элементов с напряжением 1,5 В или же водозаливной элемент, используемый с лампой накаливания 0,3 А и напряжением 2,5 В. Кроме того, в качестве источника света можно использовать устройство, основанное на принципе химической флуоресценции. Однако для зондирования на больших высотах необходима более мощная система (2–3 Вт), снабженная при необходимости простым рефлектором.

Если скорость подъема должна оставаться неизменной при использовании осветительного устройства, то теоретически требуется небольшое увеличение свободной подъемной силы, т. е. полная подъемная сила должна быть увеличена более чем на величину, соответствующую дополнительно поднимаемому весу (см. формулу 8.3). Однако на практике требуемое увеличение, вероятно, меньше рассчитанного, поскольку груз улучшает аэродинамические характеристики и устойчивость оболочки.

Раньше при подъеме в ночное время использовали небольшую свечу в фонарике из воценой бумаги, подвешенном примерно на расстоянии 2 м или ниже оболочки. Однако в этом случае возникает опасность воспламенения или взрыва при приближении свечи к оболочке или источнику водорода, а также опасность возникновения лесного пожара и других значительных пожаров при возвращении оболочки на землю. Поэтому использование свечей категорически не рекомендуется.

8.4.2 Парашюты

Для уменьшения опасности повреждений, наносимых зондирующей аппаратурой при падении, ее обычно снабжают простым парашютом. Основные требования сводятся к надежности его раскрытия и уменьшению скорости падения, которая не должна превышать $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ у земной поверхности. Кроме того, парашют должен быть водонепроницаемым. Для приборов массой до 2 кг требуется парашют, сделанный из водонепроницаемой бумаги или пластиковой пленки с куполом диаметром около 2 м и длиной строп около 3 м. Для предотвращения скручивания строп в полете целесообразно укрепить их легким обручем диаметром около 40 см из дерева, пластмассы или металла, который размещается над точкой их соединения.

Если для определения ветра используется радиолокационный отражатель, который является частью груза, то он может быть прикреплен к парашюту и препятствовать скручиванию строп. Стропы и другие приспособления должны быть способны выдерживать напряжение при раскрытии парашюта. При использовании радиозондов небольшой массы (менее 250 г) обеспечивать достаточное торможение в ходе спуска может сам радиолокационный отражатель.

8.5 ГАЗЫ ДЛЯ НАПОЛНЕНИЯ ОБОЛОЧЕК

8.5.1 Общие сведения

Наиболее подходящими для метеорологических целей газами являются гелий и водород, причем применение первого предпочтительнее из-за отсутствия опасности взрыва и воспламенения. Однако поскольку использование гелия ограничивается немногими странами, имеющими богатые природные ресурсы, более широкое применение получил водород (см. WMO, 1982). Плаучность (общая подъемная сила) гелия составляет $1,115 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ при давлении 1 013 гПа и температуре 15 °С. Соответствующее значение для чистого водорода составляет $1,203 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а для поступающего в продажу водорода эта цифра несколько ниже.

Следует отметить, что в настоящее время на борту судов больше не разрешается использовать водород в соответствии с общими требованиями техники безопасности на море. Дополнительные расходы на использование гелия должны быть оценены в сопоставлении с опасностью для жизни, а также с дополнительными расходами на страхование, если таковое может быть организовано.

За исключением транспортных расходов и трудностей транспортировки доставка сжатого газа в баллонах является наиболее удобным способом обеспечения газом метеорологических станций. Однако там, где расходы или трудности доставки баллонов исключительно велики, использование на станции генератора водорода (см. 8.5.3) не должно вызывать больших трудностей.

8.5.2 Газовые баллоны

Вероятно, наиболее удобными для общего пользования являются стальные газовые баллоны емкостью 6 м³ газа под давлением 18 МПа (10 МПа в тропиках). Однако при большом расходе газа, например, на станциях радиозондирования, рекомендуется использовать баллоны большей емкости или ряд стандартных баллонов, присоединенных при помощи коллектора к одному выпускному клапану. Эти меры значительно уменьшат трудоемкость работы персонала. Чтобы не путать баллоны с водородом с баллонами, содержащими другие газы, следует окрашивать их в особый цвет (во многих странах используется красный). Их выпускные вентили должны иметь левую резьбу, чтобы отличить их от баллонов с невоспламеняющимися газами. Баллоны должны быть снабжены колпаками для защиты вентиля при перевозке.

Газовые баллоны следует испытывать регулярно с интервалами от двух до пяти лет, в зависимости от действующих национальных инструкций. Для этого их необходимо подвергать воздействию внутреннего давления, по крайней мере на 50 % превышающего их нормальное рабочее давление. Баллоны с водородом не должны подвергаться нагреванию, и в тропиках их следует защищать от прямой солнечной радиации. Желательно, чтобы они хранились в хорошо вентилируемом помещении, что позволит обеспечить удаление водорода при любой утечке наружу.

8.5.3 Генераторы водорода

Водород можно получать на месте, используя различные типы генераторов водорода. Все генераторные установки и средства для хранения водорода должны быть отчетливо маркированы и иметь соответствующие предупредительные знаки согласно национальным правилам (например, «Этот агрегат содержит водород»; «Водород — Воспламеняющийся газ — Не курить — Открытый огонь запрещен»). Нижеследующие процессы взаимодействия оказались наиболее пригодными для производства водорода в метеорологических целях:

- a) ферросилиций и каустическая сода с водой;
- b) алюминий и каустическая сода с водой;
- c) гидрид кальция и вода;
- d) зерна железистого магния и вода;
- e) жидкий аммиак с горячим платиновым катализатором;
- f) метанол и вода с горячим катализатором;
- g) электролиз воды.

Большинство используемых в этих процессах химических веществ являются опасными, и необходимо скрупулезно соблюдать соответствующие национальные требования и инструкции по работе с такими веществами, включая правильные маркировки и предупреждения. Они требуют специального транспорта, особых условий хранения и обращения с этими веществами, а также их удаления. Многие из этих веществ вызывают коррозию, и после их использования выпадает осадок. Если указанные реакции тщательным образом не контролируются, то они могут привести к выделению избыточного тепла или повышению давления. Метанол – ядовитая разновидность спирта; если его выпить, что возможно при использовании его лицами, злоупотребляющими спиртным, это может привести к смертельному исходу.

В частности, широко используемая каустическая сода требует чрезвычайной осторожности со стороны оператора, который должен быть соответствующим образом защищен, особенно глаза, от контакта не только с раствором, но и с мелкой пылью, которая может подняться при закладке твердого материала в генератор. При несчастном случае необходимо иметь под рукой флакон с жидкостью для промывки глаз и нейтрализующее вещество, например уксус.

Некоторые из химических реакций, использующихся при этой работе, протекают при высоком давлении, и, следовательно, велик риск несчастного случая. Генераторы высокого давления должны проверяться каждые два года под давлением, по крайней мере вдвое превышающим рабочее давление. Они должны быть обеспечены предохранителями для сбрасывания излишнего давления. Предохранители обычно представляют собой разрывной диск, и очень важно строго соблюдать инструкцию по эксплуатации в отношении материала, размера и формы дисков, а также частоты их замены. Даже при надежном предохранителе может произойти выброс горячего раствора. Генераторы высокого давления следует тщательно очищать до перезарядки, поскольку остатки предыдущей закладки могут существенно уменьшить объем генератора и, следовательно, увеличить рабочее давление до значения, превышающего проектный запас прочности.

К сожалению, гидрид кальция и железистый магний, преимуществом которых является отсутствие необходимости использования каустической соды, дороги, поэтому они могут применяться только для специальных целей. Поскольку эти два вещества вытесняют водород из воды, их необходимо хранить в водонепроницаемых контейнерах. При использовании катализаторов необходимо позаботиться о том, чтобы избежать их загрязнения.

Все системы производят газ под давлением, достаточным для наполнения оболочек. Однако скорость получения газа при некоторых процессах (особенно, при электролизе) слишком мала, и газ необходимо произвести и хранить до того, как он понадобится, либо в сжатом виде, либо в газгольдере.

Методы, основанные на электролизе воды или каталитическом крекинге метанола с добавлением воды, привлекательны вследствие их относительной безопасности и умеренных текущих расходов, а также некоррозийной природы используемых веществ. Для этих двух процессов и процесса с использованием жидкого аммиака требуется электроэнергия. Оборудование является достаточно сложным и должно тщательно обслуживаться; необходима детальная ежедневная проверка эффективности работы систем контроля безопасности. Содержание минеральных веществ в воде для электролиза должно быть низким.

8.6 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА И МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

8.6.1 Общие сведения

Водород может легко воспламениться от малейшей искры; горит он почти невидимым пламенем. Смесь воздуха с водородом может гореть в широком диапазоне концентрации по объему — от 4 % до 74 % (NFPA, 1999) — и взрываться при концентрации 18–59 %. В любом случае находящийся поблизости оператор может получить сильные ожоги всех незащищенных участков кожи, а при взрыве отброшен к стене или на землю и получить серьезные травмы.

Можно исключить риск несчастного случая путем тщательно продуманных процедур и использования надлежащего оборудования при условии, что эти процедуры scrupulously соблюдаются и оборудование поддерживается в исправном состоянии (Gremia, 1977; Ludtke и Saraduke, 1992; NASA, 1968). Однако вопросам обеспечения безопасности зданий, в которых получают и хранят водород, или площадок, где наполняют или запускают шары, не всегда уделяется достаточно внимания (см. следующий раздел). В частности, необходимы комплексное обучение и постоянный тщательный мониторинг и инспекция, для того чтобы обеспечить соблюдение операторами соответствующих процедур.

Преимущества автоматических пусковых установок для запуска шаров (см. раздел 8.3.4) заключаются в том, что они обеспечивают практически защиту оператора и могут предотвратить получение им травм за счет того, что оператор не присутствует там, где находится водород.

Важным отправным моментом для рассмотрения мер предосторожности в обращении с водородом является соблюдение национальных стандартов и практических правил, касающихся поведения во взрывоопасной среде вообще. Дополнительная информация о мерах предосторожности, которые необходимо соблюдать, содержится в публикациях, посвященных проблеме опасности взрыва в больницах и на ряде производств, где существуют подобные проблемы. Оператор никогда не должен оставаться в закрытом помещении, где находится наполненная оболочка. Эта глава содержит и другие рекомендации по вопросам безопасности.

8.6.2 Проектирование помещения

Необходимо соблюдать меры предосторожности во избежание накопления свободного водорода и статических зарядов, а также появления искр в любом помещении, где получают, хранят или используют водород. Необходимо избежать накопления водорода даже в случае разрыва оболочки в укрытии при ее наполнении (WMO, 1982).

Обеспечение мер безопасности должно быть частью строительного проектирования зданий для работы с водородом (NFPA, 1999; SAA, 1985). Климатические условия и

национальные нормы и правила служат ограничительными факторами, диктующими выбор тех или иных конструкций и материалов, наиболее подходящих для строительства безопасных помещений для работы с водородом. Правила носят рекомендательный характер и используются в качестве основы для эффективных практических действий. Нормы публикуются в виде технических условий на материалы, изделия и правила техники безопасности. Они включают описание противопожарной арматуры электрического освещения, электрического оборудования для взрывоопасной среды, вентиляции помещений со взрывоопасной средой и использования пластиковых окон, разрывных дисков и т. д.

Как правила, так и нормы должны содержать полезную и нужную информацию в отношении проектных решений относительно помещений для работы с водородом. Кроме того, они должны соответствовать рекомендованной национальной практике. Национальная служба стандартов должна осуществлять руководство проектированием сооружений для работы с водородом и проверкой безопасности существующих сооружений, особенно в следующих аспектах:

- a) оптимальное расположение водородных систем;
- b) огнестойкость предложенных материалов и их соответствие существующим требованиям;
- c) требования к вентиляционному оборудованию, включая легкую конструкцию крыши для обеспечения удаления водорода и продуктов взрыва через самую высокую точку здания;
- d) соответствующее электрооборудование и электропроводка;
- e) противопожарная защита (огнетушители и сигнальные устройства);
- f) обеспечение возможности контроля оператором наполнения оболочки вне пределов того помещения, в котором она наполняется.

Необходимо принять меры к тому, чтобы свести к минимуму возможность образования искр в помещениях, где используется водород. Поэтому любая электрическая система (выключатели, осветительная арматура, электропроводка) должна находиться за пределами этих помещений. В противном случае необходимо иметь специальные искронепроницаемые выключатели, герметизированные во избежание доступа водорода, а также соответствующую электропроводку. Рекомендуются также освещать помещение через окна светильниками, находящимися вне этих помещений. По этим же причинам любые используемые инструменты не должны давать искру. Обувь наблюдателя также не должна давать искру при трении и следует обеспечить соответствующую молниезащиту.

При использовании систем пожаротушения в любой части здания необходимо учитывать возможную опасность в том случае, если в помещении все еще присутствует водород, после того как пожар был потушен. Системы обнаружения наличия водорода существуют и могут использоваться, например, для отключения электроэнергии от генератора водорода при его концентрации на уровне 20 % низшего предела взрывоопасной концентрации, а затем включения другого сигнального устройства при концентрации на уровне 40 % нижнего взрывоопасного предела.

Вокруг генератора, мест хранения и наполнения оболочек должна быть обозначена опасная зона, вход в которую разрешается только людям в защитной одежде (см. 8.6.4).

Устройство для запуска шаров (п. 8.3.4), как правило, не требует специального помещения для наполнения оболочек и в значительной степени упрощает конструкцию помещений для работы с водородом.

8.6.3 Статические заряды

Опасность работ, связанных с наполнением и запуском оболочек, можно значительно снизить путем защиты от статических зарядов помещений, где наполняются оболочки, одежды наблюдателя и самой оболочки. Loeb (1958) сообщает информацию о процессе статистической электризации. Хорошее заземление оборудования для получения водорода и арматуры, находящейся в помещениях, где наполняют оболочки, является успешным средством борьбы со статическими зарядами. Специальные антистатические зажимы на одежде наблюдателей могут удалять заряды, образующиеся на одежде (WMO, 1982).

С зарядами на оболочке справиться труднее. Ткани, из которых изготавливают оболочки, в особенности чистый латекс, являются очень хорошими изоляторами. Статические заряды образуются тогда, когда два изолирующих материала, соприкасающихся друг с другом, отделяются один от другого. Однократное касание одежды наблюдателя может привести к разряду в 20 кВ, что более чем достаточно, для того чтобы поджечь смесь воздуха с водородом, если этот разряд происходит в виде эффективной искры. Могут потребоваться многие часы, для того чтобы заряды на оболочке прошли сквозь ткань в землю или, естественно, в окружающий воздух. Было также установлено, что при разрыве оболочки расслоение ткани вдоль разрыва может давать искры, энергия которых достаточна для того, чтобы поджечь смесь.

Образование электростатических зарядов следует предотвращать, а образовавшиеся заряды — удалять путем обрызгивания водой оболочки во время наполнения, погружения оболочек в раствор антистатика (с высушиванием или без высушивания перед использованием), посредством использования оболочек с антистатической добавкой в латексе или путем обдува поверхности оболочки ионизированным воздухом. Простого заземления горловины оболочки недостаточно.

Максимальный электростатический потенциал, который может образоваться на поверхности оболочки, уменьшается с увеличением влажности, однако масштабы этого эффекта пока недостаточно хорошо установлены. Некоторые эксперименты, проведенные с наполненными оболочками массой 20 г, показывают, что при относительной влажности воздуха свыше 60 % представляется маловероятным возникновение искры с такой энергией, что она сможет вызвать воспламенение смеси водорода с кислородом. Согласно другим экспериментам, соответствующий предел относительной влажности составляет от 50 % до 76 %. Однако есть и такие исследования, которые показывают, что искры с достаточной энергией могут возникать даже при более высокой относительной влажности. Можно предположить, что статические разряды маловероятны при относительной влажности, превышающей 70 %, однако полагаться на это не стоит (см. Cleves et al., 1971).

Настоятельно рекомендуется обрызгивание оболочек тонкораспыленной водой, поскольку смачивание и заземление оболочки приводит к удалению большей части статических зарядов с увлажненных частей поверхности. Обрызгиватели должны быть спроектированы таким образом, чтобы увлажнять как можно большую часть площади оболочки и обеспечивать постоянный сток воды с оболочки на пол. При закрытых дверях влажность внутри помещения для наполнения оболочек может подняться до 75 % или выше, что приводит к уменьшению вероятности возникновения искр, обладающих достаточной энергией для того, чтобы вызвать возгорание. Запуск оболочек следует проводить сразу же после прекращения обрызгивания и открытия дверей помещения, в котором осуществляется наполнение.

Другие меры по уменьшению образования статических зарядов сводятся к следующему (WMO, 1982):

- а) помещение должно быть оснащено системой полного заземления, причем вся арматура, оборудование для получения водорода и молниеотвод должны иметь отдельное заземление, которое должно соответствовать национальным стандартам для заземляющих электродов. Необходимо предусматривать удаление электрических зарядов с пола;

- b) для наблюдателей необходимо предусмотреть места для снятия статических зарядов;
- c) окна следует регулярно протирать раствором антистатика;
- d) операторам не следует носить одежду из синтетики или изолирующую обувь. Хорошей практикой является ношение обуви, частично проводящей электричество;
- e) следует свести к минимуму контакт наблюдателя с оболочкой; это может быть достигнуто путем установки устройства наполнения на высоте не менее 1 м от пола.

8.6.4 **Защитная одежда и средства оказания первой помощи**

Надлежащую защитную одежду следует носить во всех случаях использования водорода, в ходе всех работ, включая процессы его получения, работу с баллонами, и при наполнении и запуске оболочек. Одежда должна включать в себя легкий огнестойкий плащ с капюшоном, изготовленного из несинтетического, антистатического материала и маску для защиты нижней части лица, защитные очки, хлопчатобумажные перчатки и любую рекомендованную на местах огнестойкую одежду (см. Hoschke et al., 1979).

Необходимо иметь средства, оказания первой помощи, соответствующие используемому оборудованию. Они должны включать средства первой помощи при ожогах и переломах. При использовании химикатов следует иметь под рукой соответствующие нейтрализующие растворы, например лимонную кислоту, на случай ожогов каустической содой. Должен быть в наличии аппарат для промывки глаз, готовый к немедленному использованию (WMO, 1982).

СПРАВОЧНАЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Atmospheric Environment Service (Canada), 1978: *The Use of Hydrogen for Meteorological Purposes in the Canadian Atmospheric Environment Service*, Toronto.
- Cleves, A.C., J.F. Sumner and R.M.H. Wyatt, 1971: The Effect of Temperature and Relative Humidity on the Accumulation of Electrostatic Charges on Fabrics and Primary Explosives. *Proceedings of the Third Conference on Static Electrification*, (London).
- Gremia, J.O., 1977: *A Safety Study of Hydrogen Balloon Inflation Operations and Facilities of the National Weather Service*. Trident Engineering Associates, Annapolis, Maryland.
- Hoschke, B.N. et al., 1979: *Report to the Bureau of Meteorology on Protection Against the Burn Hazard from Exploding Hydrogen-filled Meteorological Balloons*. CSIRO Division of Textile Physics and the Department of Housing and Construction, Australia.
- Loeb, L.B., 1958: *Static Electrification*, Springer-Verlag, Berlin.
- Ludtke, P. and G. Saraduke, 1992: *Hydrogen Gas Safety Study Conducted at the National Weather Service Forecast Office*. Norman, Oklahoma.
- National Aeronautics and Space Administration, 1968: *Hydrogen Safety Manual*. NASA Technical Memorandum TM-X-52454, NASA Lewis Research Center, United States.
- National Fire Protection Association, 1999: *NFPA 50A: Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- , 2002: *NFPA 68: Guide for Venting of Deflagrations*. National Fire Protection Association, Batterymarch Park, Quincy, Maryland.
- , 2005: *NFPA 70, National Electrical Code*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- , 2006: *NFPA 220, Standard on Types of Building Construction*. National Fire Protection Association, Quincy, Maryland.
- Rosen, B., V.H. Dayan and R.L. Proffit, 1970: *Hydrogen Leak and Fire Detection: A Survey*. NASA SP-5092.
- Standards Association of Australia, 1970: AS C99: *Electrical equipment for explosive atmospheres – Flameproof electric lightning fittings*.
- , 1980: AS 1829: *Intrinsically safe electrical apparatus for explosive atmospheres*.
- , 1985: AS 1482: *Electrical equipment for explosive atmospheres – Protection by ventilation – Type of protection V*.
- , 1995: ASNZS 1020: *The control of undesirable static electricity*.
- , 2004: AS 1358: *Bursting discs and bursting disc devices – Application selection and installation*.
- World Meteorological Organization, 1982: *Meteorological Balloons: The Use of Hydrogen for Inflation of Meteorological Balloons*. Instruments and Observing Methods Report No. 13. Geneva.
-